



TITLE:

# Nucleosynthesis Constraints on the Energy Growth Timescale of a Core-collapse Supernova Explosion( Abstract\_要旨 )

AUTHOR(S):

Sawada, Ryo

---

CITATION:

Sawada, Ryo. Nucleosynthesis Constraints on the Energy Growth Timescale of a Core-collapse Supernova Explosion. 京都大学, 2020, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2020-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k22249>

RIGHT:

( 続紙 1 )

|   |   |    |      |
|---|---|----|------|
| 京都大学  | 博 士（理 学）  | 氏名 | 澤田 涼 |
| 論文題目  | Nucleosynthesis Constraints on the Energy Growth Timescale of a Core-collapse Supernova Explosion<br>(重力崩壊型超新星の爆発タイムスケールについて 元素合成からの制約) |    |      |
| (論文内容の要旨)   |   |    |      |
| <p>太陽質量の10倍以上の質量を持って生まれた大質量星は、その生涯の最期に重力崩壊を起こすことで中性子星を形成し、残りの外層を爆発的に吹き飛ばすと考えられている。これは超新星爆発と呼ばれる。夜空に突発的に表れ消えていく突発天体のうちでも最も明るいものがその対応天体であり、これは超新星と呼ばれる。</p> <p>超新星爆発機構に関して、長年にわたり標準モデルとされているものが「遅延ニュートリノ爆発モデル」である。これは、以下のようなシナリオである。中性子星形成に伴い衝撃波が発生し、重力崩壊を続ける外層部に逆らって外側に伝搬していく。この衝撃波は一度停滞するが、その後中心の高温中性子星からの大量のニュートリノにより加熱され、最終的には再び外側への伝搬をはじめ、最終的には外層全部を吹き飛ばすというシナリオである。遅延ニュートリノ爆発は標準理論として広く受け入れられているが、その全貌はいまだに理解されていない。2000年代以降、詳細・正確なミクロスケールでの物理を取り入れた多次元シミュレーションが可能となり、実際にコンピュータ上で爆発を起こすようなモデルが報告されるようになってきた。シミュレーションにより重力崩壊に伴う爆発が起こることが示されつつある現状において重要な問いは、現在の第一原理的シミュレーション上で生じる爆発現象は、本当に観測されているような超新星の様々な性質を再現し得るのかという問題である。</p> <p>第一原理的計算は爆発のごく初期しか計算できないため、観測データとの比較には、シミュレーション結果や鍵となる物理過程を単純化した現象論的モデルが用いられる。実際、このような現象論的モデルにより個々の超新星の観測的性質が良く説明されており、超新星爆発の際に生じる激しい原子核反応（元素合成）計算をもとに現在の宇宙に至る重元素生成史（銀河化学進化）を通し、その妥当性が検証されてきた。最新の第一原理に基づき予想される爆発が、これらの観測的制限を満たすことができるかは自明ではない。</p> <p>上述したように、第一原理計算の結果を直接観測データと比較することは現在不可能である。そこで、本論文では、第一原理計算から得られる爆発の性質をモデル化した現象論的モデルを構築することで、現在の最新爆発モデルの妥当性を検証するとともに、超新星爆発で鍵となる条件を探ることを目的としている。申請者は、第一原理的計算を精査することで、最新の爆発モデルが共通してもつ特徴に注目した。これは、爆発の典型的なタイムスケールである。従来の現象論的モデルでは、瞬間的な爆発が仮定されてきた。一方で、最新の第一原理的計算では、数秒程度のタイムスケールでゆっくりと爆発エネルギーが増加していくという結果が得られている。これは、非常にゆっくりとした爆発であり、瞬間的な爆発とはみなせない。原子核反応の起こるタイムスケールが数秒程度であるため、特に爆発の際の原子核反応に多大な影響が出るのが推測される。</p> <p>この考察を受け、本論文では、「爆発のタイムスケール」をパラメータとし、中性子星表面から外層を伝搬する衝撃波に流体計算を行い、さらに詳細な原子核反応計算を行うことで、超新星元素合成が爆発のタイムスケールにどのように依存するかを明</p> |   |    |      |

らかにし、その結果から爆発のタイムスケールに観測的制限をつけることを試みた。

その結果、これまで現象論的モデルでは考慮されていなかった爆発タイムスケールが元素合成に大きな影響を与えることが分かった。長時間かけて爆発するモデルでは、衝撃波後方に十分なエネルギーが供給されて高温になる前に衝撃波が外層に広がってしまい、短時間爆発（瞬間的爆発）の場合ほどの激しい原子核反応がおこらないことが明らかにされた。結果として、放射性崩壊同位体である $^{56}\text{Ni}$ 、 $^{57}\text{Ni}$ 、 $^{44}\text{Ti}$ などの生成量が非常に少なくなる。また、鉄族元素間の質量比に特徴が現れ、爆発タイムスケールが長くなるほどMn/Feの質量比は増加し、一方でCo/Feは減少することなどが明らかになった。

これらの性質から、爆発タイムスケールが長くなるほど、個々の超新星観測データから求められる放射性崩壊同位体質量や、銀河系におけるMn、Co、Feの相対質量比等の豊富な観測データと矛盾が大きくなることが判明した。観測データとの比較から、瞬間的な爆発（ $<50$ ミリ秒）が最も良く観測データを再現し、爆発のタイムスケールは最大でも250ミリ秒までが観測データを再現する許容範囲であるという強い制限が得られた。これは、天体现象としての超新星爆発を再現するために、今後の第一原理的シミュレーションが満たすべき重要な条件となる。

(続紙 2 )

(論文審査の結果の要旨)

超新星爆発機構は天文学における重要な未解明問題として知られる。遅延ニュートリノ爆発という標準モデルがあるが、このモデルに基づく第一原理的計算を行っても、コンピュータ上で超新星爆発を起こすことができないという状況が長年続いていた。2000年代に入り、ニュートリノ輸送などの詳細な微視的物理を取り扱いつつ多次元流体計算を実行することが可能になってきた。これにより、中性子星表面で発生した衝撃波が最終的に星の外層部に向かって膨張を始めるという「爆発」現象がシミュレーション結果として得られるようになってきた。

しかし、シミュレーション上で発生している爆発現象が、本当に観測されている超新星の性質を説明できるかの検証をもって初めて超新星爆発機構の真の理解が得られる。また、超新星爆発は鉄をはじめとする様々な重元素を合成するため、超新星爆発モデルは現在の宇宙に存在する様々な元素の存在量を説明できなければならない。

大規模な第一原理計算では爆発のごく初期を取り扱うことしかできず、直接観測データからその妥当性を検証することは現状不可能である。申請者は、第一原理的計算結果を精査することで、その特徴を良く表すような現象論的モデルを構築、詳細な元素合成計算を行うことで、理論モデルと観測との比較を可能とした。

この特徴は、爆発エネルギーの増加にかかるタイムスケールである。最新の第一原理的計算は、数秒程度の非常に長いタイムスケールを予測している。申請者は、これまで超新星元素合成研究において無視されてきたこの爆発タイムスケールが、超新星で生成・放出される様々な元素の量に多大な影響を与えることを明らかにした。その結果を個々の超新星の観測、銀河化学進化からの制約等と比較することで、超新星爆発機構の現状での最新の理論的予想に対し、初めて観測的に強い制約を与えた。

申請者は、爆発のタイムスケールは最大でも250ミリ秒程度でなくてはこれらの制約を満たすことができず、したがって現在の第一原理的大規模シミュレーションで確認されつつある爆発現象は超新星爆発としては不十分であることを明らかにした。天体物理学上の重要問題である超新星爆発機構の現状の理解はまだ不十分であり、観測データとの比較に基づき爆発機構が満たすべき条件を明確にしたものとして、天文学分野の研究における重大な知見であると判断できる。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和2年1月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日：                      年                      月                      日以降